

# 用菲涅尔区板天线实现来波方向的鲁棒性估计

蒋 泽<sup>1 2 3</sup> 杜惠平<sup>1 2</sup>, 阮颖铮<sup>3</sup>

( 1. 重庆邮电学院 光电工程学院, 重庆 400065 ;  
2. 东南大学 毫米波国家重点实验室, 江苏 南京 210096 ;  
3. 电子科技大学 电子工程学院, 四川 成都 610054 )

**摘要** :针对蜂窝移动通信局域散射电波传播的空间分布源模型,研究了应用菲涅尔区相位修正平面聚焦结构和馈源阵列的组合形成的一种新型多波束自适应天线.基于广义 MUSIC 算法及极大似然估计算法,分别实现相干及非相干的空间分布式源信号来波方向及其角度扩展参数的鲁棒性估计问题.数值仿真计算结果表明,在这一无线传播环境中,基于菲涅尔区相位修正平面聚焦结构在减小相关参数估计的 RMS 误差等方面,其性能优于传统的均匀直线阵列模型.因此基于该新型自适应天线,可以实现来波方向的鲁棒性估计.

**关 键 词** 阵列信号处理;参数估计;极大似然估计;菲涅尔区相位修正平板  
中图分类号 :TN911.7 文献标识码 :A

## ROBUST ESTIMATION FOR THE DIRECTION OF ARRIVAL BY FRESNEL ZONE PLATE ANTENNA

JIANG Ze<sup>1 2 3</sup>, DU Hui-ping<sup>1 2</sup>, RUAN Ying-Zheng<sup>3</sup>

( 1. College of Electronic Engineering, Chongqing University of Posts & Telecommunications, Chongqing 400065, China ;  
2. State key Lab of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing 210096, China ;  
3. College of Electronic Engineering, University of Electronic Science & Technology  
of China, Chengdu 610054, China )

**Abstract** :A novel multi-beam adaptive antenna was investigated by considering the spatially distributed source model for local scattering radio propagation in cellular mobile communications. This antenna is consisted of a focusing configuration with Fresnel zone phase - correcting plate( FZP ) and feeding array. The robust estimation of parameters ( direction-of-arrival ( DOA ) and angular spread ) was studied based on the generalized MUSIC algorithm and the maximum likelihood estimation in the case of coherently and incoherently spatially distributed source respectively. Simulation results show that the FZP configuration outperforms the uniformly linear array( ULA ) in reducing the estimation errors of the RMS in the considered propagation environment. Therefore a robust estimation of DOA can be achieved with this novel adaptive antenna.

**Key words** array signal processing ; parameter estimation ; maximum likelihood estimation ; Fresnel zone phase-correcting plate

### 引言

在移动通信环境中,由于移动终端附近大量散射体的存在,将直接导致微波传播的多径色散效应.这一特点使得传统的空间谱估计理论中基于点源信号模型下的若干经典技术在移动通信中的应用面临诸多问题.所谓局域散射模型,就是指从移动通信系统的基站天线阵列来看,可以仅仅

考虑移动终端附近散射体对来波信号的影响,从而可用空间分布式源来模拟实际来波信号的散射传播特征<sup>[1~4]</sup>.在这一近似下,信号的波达方向通过其均值方向 $\theta$ 及其小的角度扩展 $\sigma_\theta$ 表示的参数化模型进行描述,因此通过对上述参数对的搜索,可以有效地实现信号波达方向的鲁棒性估计,为移动通信系统中基于波达方向估计的波束赋形技术提供应用基础.

## 1 空间分布式源的模型描述

考察  $Q$  个窄带空间分布式信号源入射到阵列的情形,为简化处理,可以首先考虑源与阵列位于同一平面内的情况.此时,阵列输出观测矢量的复包络可以表示为:

$$\mathbf{x} = \sum_{i=1}^Q \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \mathbf{F}(\theta) s_i(\theta; \boldsymbol{\psi}_i) d\theta + \mathbf{n} \quad (1)$$

式(1)中  $\mathbf{F}(\theta)$  为阵列响应矢量,  $s_i(\theta; \boldsymbol{\psi}_i)$  表示第  $i$  个信号在  $\theta \in [-\pi/2, \pi/2]$  方向的角分布密度函数,  $\boldsymbol{\psi}_i = (\theta_i, \sigma_{\theta_i})$  为未知参数矢量集,  $\mathbf{n}$  为  $p \times 1$  加性噪声矢量.

将  $s_i(\theta; \boldsymbol{\psi}_i)$  看作随机变量,  $\mathbf{n}$  为随机矢量,并假设信号与噪声互不相关,则可得到观测矢量的相关矩阵表示如下

$$\mathbf{R}_x = E(\mathbf{x}\mathbf{x}^H) = \mathbf{R}_s(\boldsymbol{\psi}) + \mathbf{R}_n \quad (2)$$

式(2)中  $\mathbf{R}_s(\boldsymbol{\psi})$  表示理想的阵列输出自相关矩阵,  $\mathbf{R}_n$  为噪声协方差矩阵.令  $p_{ij}(\theta, \theta'; \boldsymbol{\psi}_i, \boldsymbol{\psi}_j) = E[s_i(\theta; \boldsymbol{\psi}_i) s_j^*(\theta'; \boldsymbol{\psi}_j)]$ , 称为信号的角度互相关核.当来自不同源的信号彼此互不相关时,互相关核为:

$$p_{ij}(\theta, \theta'; \boldsymbol{\psi}_i, \boldsymbol{\psi}_j) = p_i(\theta, \theta'; \boldsymbol{\psi}_i) \delta_{ij} = E[s_i(\theta; \boldsymbol{\psi}_i) s_i^*(\theta'; \boldsymbol{\psi}_i)] \delta_{ij} \quad (3)$$

进一步地,针对不同的应用环境,可以考虑两种特殊情形:相干( Coherently Distributed source, CD ) 和非相干( In Coherently Distributed source, ID ) 分布式源.对于 CD 源:

$$s_i(\theta; \boldsymbol{\psi}_i) = \gamma_i g(\theta; \boldsymbol{\psi}_i) \quad (4)$$

$\gamma_i$  为随机变量,  $g(\theta; \boldsymbol{\psi}_i)$  是一参数矢量未知,但其结构形式已知的确定性函数.对于 ID 源的情形,不同方向的来波信号在时间上互不相关,因此有:

$$p_i(\theta, \theta'; \boldsymbol{\psi}_i) = p_i(\theta; \boldsymbol{\psi}_i) \delta(\theta - \theta') \quad (5)$$

$p_i(\theta; \boldsymbol{\psi}_i)$  为角度功率谱,或简单的称为功率方位谱.

## 2 基于扩展 MUSIC 算法的参数矢量估计

文献[1]将信号子空间和噪声子空间概念推广到分布式信号源的情形,得到与点源模型类似的分布式源空间谱估计. MUSIC 算法实现形式如下所示:

$$\hat{\boldsymbol{\psi}} = \arg \max_{\boldsymbol{\psi}} \frac{1}{\text{Tr}(\mathbf{E}_n^H \mathbf{H}(\boldsymbol{\psi}) \mathbf{E}_n)} \quad (6)$$

式(6)中  $\text{Tr}(\cdot)$  表示矩阵求迹运算,  $\mathbf{H}(\boldsymbol{\psi})$  为阵列流形,定义如下:

$$\mathbf{H}(\boldsymbol{\psi}) = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \mathbf{F}(\theta) p^*(\theta, \theta'; \boldsymbol{\psi}) \mathbf{F}^H(\theta') d\theta d\theta'$$

$\mathbf{E}_n = [\mathbf{e}_1, \dots, \mathbf{e}_{p-Q}]$  为噪声子空间的一组基.

然而,对于 ID 源的情形,由于  $\mathbf{R}_s(\boldsymbol{\psi})$  通常为满秩阵,导致  $\Re^\perp$  为零空间,因此不能直接应用式(6)于 ID 源的参数估计问题.

## 3 参数矢量的极大似然估计算法

从上面我们看到,在 ID 源的情况下, MUSIC 算法的实现是以对于等效信号子空间的求解为前提的,这对于实际应用来说是不方便的.但是,如果噪声满足空-时白噪声的条件,则在这种情况下的观测数据矢量为零均值的复高斯随机矢量<sup>[5]</sup>,因此,如同点源信号的情形一样,可以应用极大似然估计算法来实现对于分布式源参数矢量的估计.由归一化的对数似然函数有

$$l(\sigma_s^2, \sigma_n^2, \sigma_\theta^2, \boldsymbol{\theta}) = \log |\mathbf{R}_x| + \text{Tr}\{\mathbf{R}_x^{-1} \hat{\mathbf{R}}_N\} \quad (7)$$

式(7)中  $\hat{\mathbf{R}}_N$  为样本协方差矩阵,  $N$  为快拍次数,  $\sigma_s^2$  为信号功率.于是得到参数矢量  $\boldsymbol{\eta} = [\sigma_s^2, \sigma_n^2, \sigma_\theta^2, \boldsymbol{\theta}]^T$  的极大似然估计算法描述为:

$$\hat{\boldsymbol{\eta}} = \arg \min_{\boldsymbol{\eta}} l(\sigma_s^2, \sigma_n^2, \sigma_\theta^2, \boldsymbol{\theta}) \quad (8)$$

## 4 仿真结果

以文献[5]中的 FMBA 模型为例进行分析,设定馈源 ULA 阵元间距为半波长( $\lambda/2$ ).以 30 个具有随机幅度和相位分布的信号分量来模拟具有空间结构的 ID 接收信号,各信号分量的 DOA 随机的从均值等于待估计 DOA 的高斯分布中选择.对于 CD

信号源,则取确定性的  $g(\theta; \boldsymbol{\psi}_i) = \frac{K_i}{1 + j \frac{\theta - \theta_i}{\sigma_{\theta_i}}}$ ,  $K_i$

为归一化因子. RMS( Root-Mean-Square ) 的值基于 50 次独立实验而获得.同时,通过与 ULA 的比较以便更好的说明其相关性能.

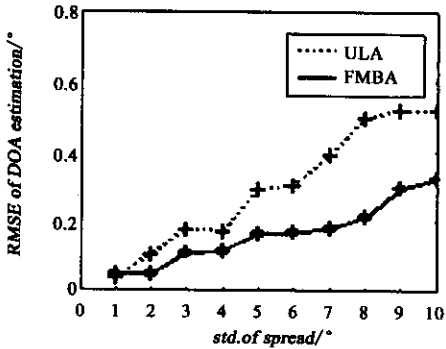


图1 DOA 估计 RMSE 与角度扩展  $\sigma_\phi$  的关系  
Fig.1 RMSE value of the DOA estimate versus  $\sigma_\phi$

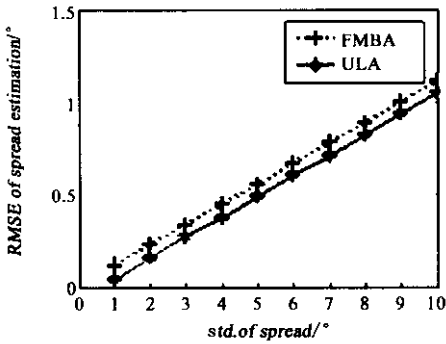


图2 角度扩展估计 RMS 值与  $\sigma_\phi$  的关系  
Fig.2 RMS value of the angular spread estimate  $\sigma_\phi$

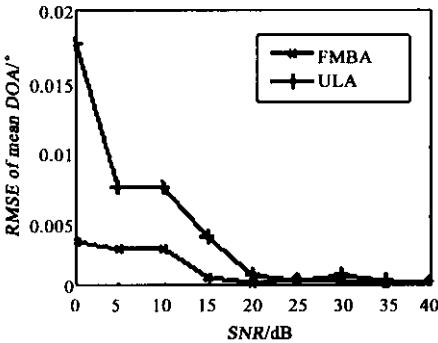


图3 DOA 估计 RMSE 与 SNR 的关系(  $\theta = 0^\circ$  )  
Fig.3 Estimation RMSE of mean DOA versus SNR for  $\theta = 0^\circ$

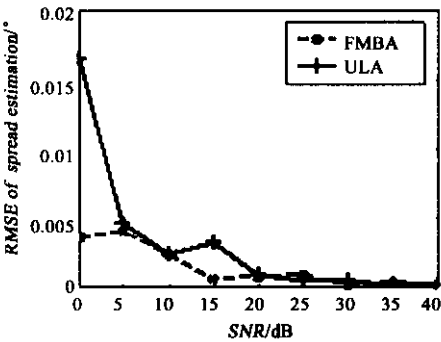


图4 角度扩展估计 RMSE 与 SNR 的关系(  $\sigma_\phi = 5^\circ$  )  
Fig.4 Estimation RMSE of the angular spread versus SNR for(  $\sigma_\phi = 5^\circ$  )

4.1 角度扩展对性能的影响

通过角度扩展变化对信号参数估计精度影响的分析,可以考察 FMBA 空间谱估计性能的鲁棒性.本算例中,取  $SNR = 10\text{dB}$ (信号功率  $\sigma_s^2 = 10$ ,噪声功率  $\sigma_n^2 = 1$ ),分布式源的中心 DOA 为  $0^\circ$ ,快拍次数  $N = 100$ ,ULA 馈源阵列数目  $p = 10$ ,角度扩展  $\sigma_\phi$

在  $1^\circ \sim 10^\circ$  的范围内变化, FZP 反射面半径与设计焦距相等,均等于  $8\lambda$ .图 1 和图 2 分别表示在 ID 源的情形下,应用极大似然估计算法对于中心 DOA 及其扩展估计的 RMS 变化曲线.可以看出,相对于这一分布式源模型及算法结构,FMBA 均表现出了较之基于 ULA 结构更为优越的估计性能,这与我们前述的有关定性分析结论是一致的.

4.2 SNR 对性能的影响

本算例中,取  $SNR = 0 \sim 40\text{dB}$ ,快拍次数  $N = 50$ ,CD 信号源中心 DOA 为  $0^\circ$ ,角度扩展  $\sigma_\phi = 5^\circ$ ,ULA 馈源阵列数目  $p = 10$ .基于式(6)的谱峰搜索,所得估计误差如图 3 和图 4 所示.从图中看到,随着 SNR 的增加,中心角度及角度扩展估计均表现出良好的渐进一致性,这与有关理论分析是吻合的.同时,随着 SNR 的增加,FMBA 能够更快并平稳的达到其相应的渐进性能.这仍然是得益于 FZP 聚焦结构的作用,因为相对于上述特定的角域分布,基于正馈设计的 FZP 结构较好地实现了对来波的良好聚焦.

5 结语

由于移动通信信道的空间色散效应,传统阵列信号处理中的点源信号模型需要代之以空间分布式源结构才能对相关问题进行较为精细的描述,并由此需要更为有效的算法或新型阵列结构以实现信号空间谱参数的有效估计.相关结果表明,基于 FMBA 聚焦结构的特点及其物理映射作用,应用扩展 MUSIC 算法和极大似然算法,不失为该类产品的一种最佳解决方案.

REFERENCES

[ 1 ]Valace S , Champagne B , Kabal P. Para- metric localization of distributed sources[ J ]. *IEEE Trans. on SP* , 1995 , **43** ( 9 ) : 2144—2153.  
[ 2 ]Bengtsson M , Ottersten B. Low-complexity estimators for distributed source[ J ]. *IEEE Trans. on SP* , 2000 , **48**( 8 ) : 2185—2194.  
[ 3 ]Besson O , Stoica P. Decoupled estimation of DOA and angular spread for a spatially distributed source[ J ]. *IEEE Trans. on SP* , 2000 , **48**( 7 ) : 1872—1882.  
[ 4 ]Trump T , Ottersten B. Estimation of nominal direction of arrival and angular spread using an array of sensors[ J ]. *Signal Processing* , 1996 , **50** : 57—69.  
[ 5 ]Jiang Ze , Du Hui-Ping , Ruan Ying-Zheng. Performance analysis on the spatial spectrum estimation of a novel adaptive antenna[ J ]. *J. Infrared Millim. Waves*( 蒋泽 杜惠平 阮颖铮. 一种新型自适应天线的空间谱估计性能分析. 红外与毫米波学报 ) , 2003 , **22**( 2 ) : 114—118.

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深, 让许多工程师望而却步, 然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上, 我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识, 借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养, 推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程, 化繁为简, 直观易学, 可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛, 让天线设计不再难...



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书, 课程从基础讲起, 内容由浅入深, 理论介绍和实际操作讲解相结合, 全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程, 可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计, 让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程, 由经验丰富的专家授课, 旨在帮助您从零开始, 全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程, 边操作边讲解, 直观易学; 购买套装同时赠送 3 个月在线答疑, 帮您解答学习中遇到的问题, 让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程, 培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合, 全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作, 同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习, 可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com)),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养,更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果,又能免除您舟车劳顿的辛苦,学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲,结合实际工程案例,直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>